



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

안티와인드업을 결합한 PID 제어기의  
유전알고리즘에 기초한 동조

GA-Based Tuning of a PID Controller Incorporating an  
Anti-windup Scheme

指導教授 陳 康 奎



2018年 8月

韓國海洋大學校 大學院

制 御 計 測 工 學 科

朴 東 鎮

본 논문을 박동진의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 공학박사 김 종 화



위 원 공학박사 최 진 규



위 원 공학박사 진 강 규



2018년 8월 27일

한국해양대학교 대학원

제어계측공학과

# 목 차

Abstract .....	iii
List of Figures .....	iv
List of Tables .....	v
제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구배경 .....	1
1.2 연구내용 및 구성 .....	2
제 2 장 PID 제어기 .....	3
2.1 PID 제어 시스템 .....	3
2.2 표준형 PID 제어기 .....	3
2.3 1차 필터를 갖는 PID 제어기 .....	5
2.4 PID 제어기 동조 .....	8
2.4.1 동조란 .....	8
2.4.2 동조방법 .....	8
제 3 장 적분기 안티와인드업 기법 .....	11
3.1 적분기 와인드업 .....	11
3.2 기존의 적분기 안티와인드업 기법 .....	12
3.2.1 조건부 적분 안티와인드업법 .....	13
3.2.2 추종 안티와인드업법 .....	13
3.2.3 가변구조 PID 안티와인드업법 .....	14
3.2.4 제안하는 안티와인드업법 .....	15

제 4 장	안티와이드업을 갖는 PID 제어기의 동조	17
4.1	기존의 방법	17
4.2	수정된 안티와이드업을 갖는 PID 제어기	17
4.3	GA를 이용한 파라미터 동조	18
제 5 장	모의 실험 및 결과 검토	21
5.1	프로세스 I	22
5.2	프로세스 II	28
5.3	프로세스 III	30
제 6 장	결론	33
참고문헌		34



# GA-Based Tuning of a PID Controller Incorporating an Anti-windup Scheme

*Dong-Jin Park*

*Department of Control & Instrumentation Engineering,  
Graduate School, Korea Maritime University*

## ABSTRACT

Many practical processes in industry have nonlinearities of some forms. One commonly encountered form is actuator saturation which can cause a detrimental effect known as *integrator windup*. The integrator windup problem often leads to inconsistency between the controller output and the process input. As a result, the tuning of the process based on its linear model may exhibit a strikingly different behaviour from its implementation as soon as an actuator saturation affects the operation and even the stability can be lost. Therefore, a strategy of attenuating the effects of integrator windup is required to guarantee the stability and performance of the overall control system.

In this thesis, a strategy in tuning a proportional-integral-derivative (PID) controller with an anti-windup scheme is presented to enhance the tracking performance of the PID control system in the presence of the actuator saturation. First, existing anti-windup schemes are investigated and an effective anti-windup scheme is adopted. Then, the parameters of the PID controller incorporating the anti-windup scheme are optimally tuned by a genetic algorithm (GA) such that the integral of absolute error is minimized. A

set of simulation works on three high-order processes demonstrates the benefit of the proposed method.



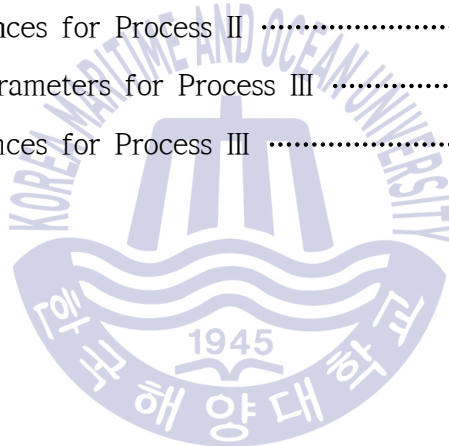
# List of Figures

Fig. 2.1	PID control system .....	3
Fig. 2.2	Structure of the PID controller .....	4
Fig. 2.3	Magnitude spectrum of the ideal derivative $j\omega$ .....	5
Fig. 2.4	Magnitude spectrum of the derivative with a first-order filter .....	6
Fig. 2.5	Ideal derivative and practical derivative .....	7
Fig. 2.6	Responses of ideal derivative and practical derivative .....	8
Fig. 3.1	Step response of a system with and without a saturation .....	12
Fig. 3.2	Tracking anti-windup method .....	14
Fig. 3.3	Variable structure PID anti-windup method .....	15
Fig. 4.1	PID controller with a modified-AW method .....	18
Fig. 4.2	Basic steps of a GA .....	19
Fig. 5.1	Parameter tuning using the GA .....	22
Fig. 5.2	Comparison of set-point tracking responded for Process I .....	24
Fig. 5.3	Optimal and suboptimal set-point tracking response for Process I ..	26
Fig. 5.4	Set-point tracking response when random noise $N(0,0.003^2)$ exist ...	26
Fig. 5.5	Saturated input when random noise $N(0,0.003^2)$ exist .....	27
Fig. 5.6	Comparison of set-point tracking response for Process II .....	29
Fig. 5.7	Comparison of set-point tracking response for Process III .....	31



## List of Tables

Table 2.1	Ziegler-Nichols tuning rule (first method) .....	10
Table 3.1	Performance comparison of the anti-windup methods .....	16
Table 5.1	Tuning rules based on the S-curve response .....	21
Table 5.2	Tuned Parameters for Process I .....	23
Table 5.3	Performances for Process I .....	25
Table 5.4	Tuned Parameters for Process II .....	28
Table 5.5	Performances for Process II .....	29
Table 5.6	Tuned Parameters for Process III .....	30
Table 5.7	Performances for Process III .....	31



# 제 1 장 서론

## 1.1. 연구배경

자동화 추세에 발맞추어 PID 제어기는 기계, 전기, 유화공 분야를 포함한 모든 산업분야에서 가장 많이 사용되어온 대표적인 제어 장치로써 설정치 추종과 외란제거 성능 개선에 성공적으로 대처해 왔다. PID 제어기가 이처럼 산업현장에서 광범위하게 인정받게 된 것은 현장 기술자들이 쉽게 이해할 정도로 그 구조가 단순하고, 구현이 쉽고, 동조가 간단하고 또 안티와인드업(Anti-windup), 무충격 전환(Bumpless transfer) 등과 같은 부가적인 기능과 쉽게 결합될 수 있기 때문이다.

이런 범용성에 힘입어 현재까지 많은 동조법들이 문헌을 통해 제안되어 왔다 [1-4]. 그러나 이들의 대부분은 한정된 분류의 프로세스 모델에 기초하고 있어 프로세스가 복잡할수록 그 안정성이 결여되고, 적용도 제한될 수밖에 없다. 특히 산업현장에서 운전되고 있는 제어시스템들은 어떤 형태로든 비선형 요소들을 내포하고 있고, 그 중 가장 흔히 접하는 것 중에 하나가 액추에이터(Actuator)이다.

PID 제어루프에 액추에이터 포화가 내재된 경우에 설정치를 과도하게 변경하거나 큰 외란이 들어오게 되면 액추에이터 동작의 물리적인 한계로 인해 제어 입력이 포화되면서 적분기 와인드업(Integrator windup)으로 알려진 바람직스럽지 못한 영향이 일어나게 된다. 이런 영향으로 인해 응답의 오버슈트가 커지고, 도달시간 및 정착시간이 더 길어질 뿐만 아니라 경우에 따라서는 전체 시스템이 불안정해지기도 한다.

이런 적분기 와인드업 문제를 극복하기 위해 다수의 연구들이 수행되어 왔다 [1,5-9,13,14]. Krikelis [5]는 적분기의 출력값을 액추에이터의 선형구간 내에 유지하도록 데드존(Dead zone)이 있는 Hard limiter를 사용하는 방법을 제안하였고, Rundqwist [6]는 특정한 조건에 따라 적분동작을 ON/OFF 스위칭하는 4가지

형태의 조건부 적분(Conditional integration)법을 제안하면서, 그 중에서 제어오차와 제어입력의 부호가 같고 제어입력에 포화가 일어날 때 적분동작을 OFF시키는 것이 가장 좋은 결과를 준다고 보고하고 있다. Åström과 Hägglund [1]는 포화기의 입출력 차이를 적분기의 입력단에 연속적으로 피드백하여 적분동작을 수정하는 문제를 다루었다. 한편 Hodel과 Hall [7]은 제어입력이 포화 속으로 들어가면 제어입력이 포화기의 가장자리에 놓이도록 특정 조건에 따라 적분기의 입력을 스위칭하는 가변구조 PID 안티와인드업 기법을 제안하였다.

그러나 이들은 액추에이터 포화를 무시한 제어대상을 대상으로 제어를 동조한 후, 적분 와인드업을 보상하는 부가적인 기능을 적용함으로써 성능개선의 여지를 남기고 있다.

## 1.2 연구내용 및 구성

따라서 본 연구에서는 기존 연구의 단점을 개선하도록 안티와인드업 기법과 결합된 PID 제어를 설계하여 설정치 추종 성능을 개선하는 문제를 다룬다. 이를 위해 먼저 본 방법에 채용할 안티와인드업 기법을 유도해내기 위해 기존의 방법을 분석하며, 최적화 알고리즘인 유전알고리즘 (GA)을 이용하여 추종 성능이 개선되도록 PID 제어기와 제안하는 안티와인드업의 파라미터를 동시에 최적 동조한다. 제안하는 방법은 시뮬레이션을 통해 기존의 방법과 비교하여 그 유효성을 검토한다.

본 논문은 총 6장으로 구성되며, 각 장에서 수행한 연구내용을 간단히 기술하면 다음과 같다. 2장에서는 PID 제어기의 구조와 동조법에 대하여 요약 설명한다. 3장에서는 기존의 몇 가지 적분기 안티와인드업 기법에 대하여 살펴보고 새로운 방법을 제안한다. 4장에서는 제안된 안티와인드업과 결합된 PID 제어를 최적화 기법 중 하나인 유전알고리즘으로 동조하는 문제를 다룬다. 5장에서는 3장과 4장에서 구현된 제어기와 적분기 안티와인드업 기법을 세 가지 고차 시스템에 적용하여 설정치 추종과 잡음에 대한 강인성 모의실험을 실시하고 다른 방법의 결과와 비교 검토한다. 마지막으로 6장에서는 최종적인 결론을 정리한다.

## 제 2 장 PID 제어기

### 2.1 PID 제어 시스템

먼저 그림 2.1과 같은 제어 시스템을 생각하자. PID 제어 시스템은 크게 PID 제어기  $C(s)$ , 제어대상  $P(s)$ 와 비선형 입력포화(Input saturation)로 구성되고, 센서는 제어대상에 포함된 것으로 간주한다.

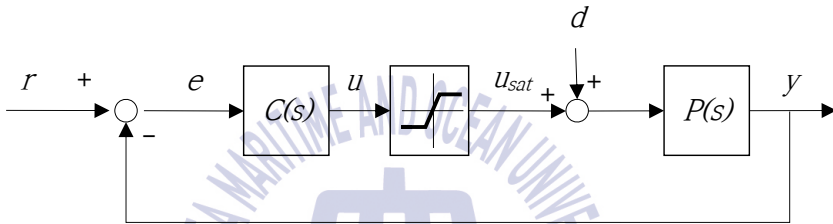


그림 2.1 PID 제어 시스템  
Fig. 2.1 PID control system

그림에서  $r(t)$ ,  $y(t)$ ,  $d(t)$ 는 각각 설정치, 출력과 외란을,  $u(t)$ 는 제어입력을,  $u_{sat}(t)$ 는 입력포화의 출력을 의미한다. PID 제어기  $C(s)$ 는 설정치(Set-point)가 변경되거나 외란이 들어와도 오차  $e(t) = r(t) - y(t)$ 의 비례, 미분, 적분 동작을 적절히 조합하여 출력이 설정치를 잘 추종하고 또 외란을 제거해주는 역할을 담당하게 된다.

### 2.2 표준형 PID 제어기

표준형 PID 제어기의 전달함수는 식 (2.1)로 주어지고, 그림 2.2는 그 구조를 보여준다.

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.1a)$$

$$= K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.1b)$$

여기서  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ 는 각각 비례이득(Proportional gain), 적분시간(Integral time), 미분시간(Derivative time)을  $K_i = K_p/T_i$ ,  $K_d = K_p T_d$ 는 각각 적분이득(Integral gain)과 미분이득(Derivative gain)을 의미한다.

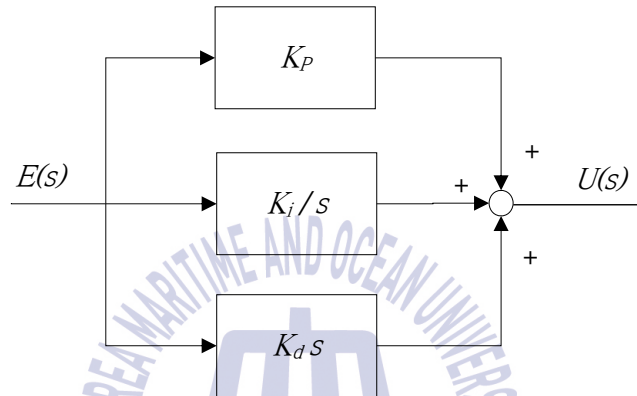


그림 2.2 PID 제어기의 구조  
Fig. 2.2 Structure of the PID controller

PID제어기에서 미분동작은 오차의 변화율을 감지하여 이에 비례한 출력을 냄으로써 과도상태를 개선해주지만, 식 (2.1)의 이상적인 미분동작은 고주파 잡음에 대단히 민감하고 또 구현이 쉽지 않는 단점을 가진다. 이를 확인하기 위해 미분동작의 전달함수  $C_d(s) = K_p T_d s$ 로부터 주파수 전달함수의 크기를 구하면 다음 식과 같다.

$$|C_d(j\omega)| = K_p T_d \omega \quad (2.2)$$

식 (2.2)와  $K_p = 1$ ,  $T_d = 1$ 로 하여 이를 그린 그림 2.3에서 볼 수 있듯이  $|C_d(j\omega)|$ 는  $\omega$ 에 비례해서 증가하게 되므로, 만약 고주파 잡음이 센서를 통해 유입되면 미분폭주(Derivative kick) 현상이 일어나게 된다.

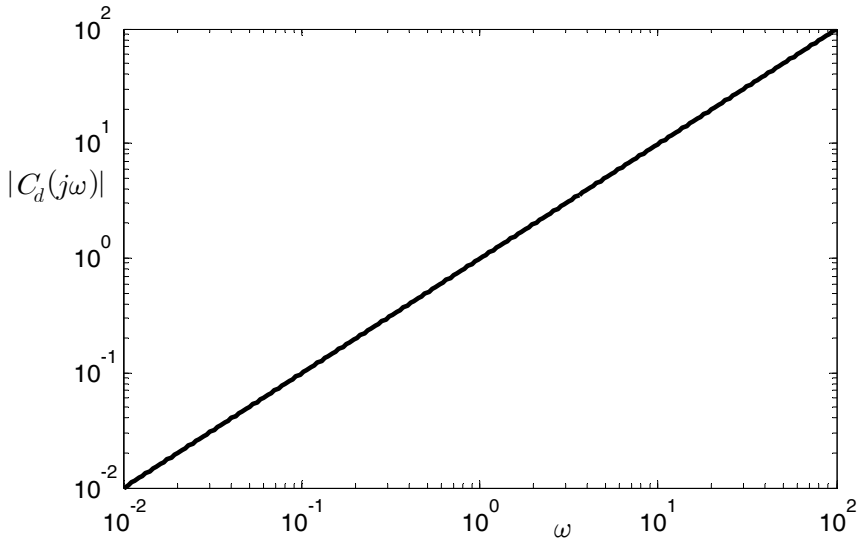


그림 2.3 이상적인 미분의 크기 스펙트럼  
 Fig. 2.3 Magnitude spectrum of the ideal derivative  $j\omega$

### 2.3 1차 필터를 갖는 PID 제어기

이런 표준형 PID 제어기의 문제점을 보완하기 위해 현장에서는 주로 분모에 1차 필터를 갖는 수정식 식 (2.3)을 사용하고 있다. 본 논문에서도 이 식을 사용한다.

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + T_f s} \right) \quad (2.3a)$$

$$= K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{1 + T_f s} \quad (2.3b)$$

여기서  $T_f = T_d/N$ 는 필터 시정수이고,  $N$ 은 최대 미분이득(Maximum derivative gain)으로서 대개 5~20 사이에서 경험적으로 정해지는 상수이다[16]. 여러 문헌에는  $N=10$ 을 사용하고 있으므로 본 논문에서도 이 값을 사용한다.

한편 식 (2.3)을 사용함으로써 미분동작의 주파수 전달함수의 이득은

$$|C_d(j\omega)| = K_p T_d \omega / \sqrt{1 + T_f^2 \omega^2} \quad (2.4)$$

이 되고, 그림 2.4는  $K_p = 1$ ,  $T_d = 1$ 일 때 세 가지  $N$ 에 대하여 이를 그린 것이다. 식 (2.4)와 그림 2.4에서 보면  $\omega \rightarrow \infty$  일 때  $|C_d(j\omega)| = K_p N$ 에 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

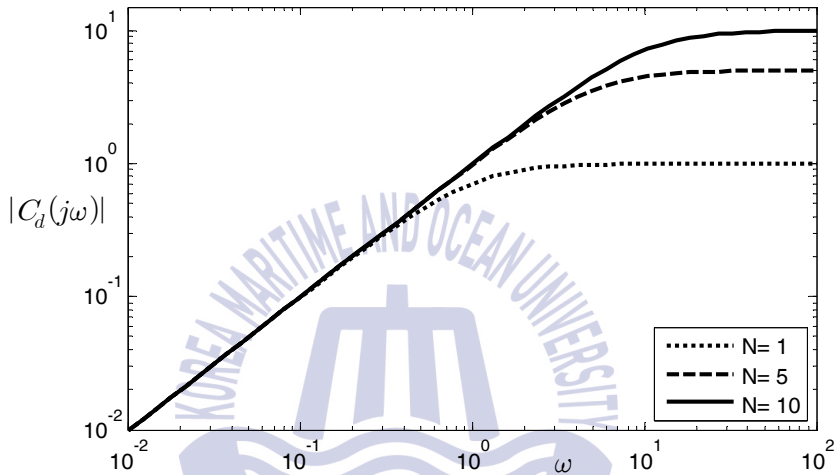


그림 2.4 1차 필터를 갖는 미분의 주파수 스펙트럼

Fig. 2.4 Magnitude spectrum of the derivative with a first-order filter

그림 2.5는 랜덤 잡음에 대한 이상적인 미분과 1차 필터를 갖는 미분의 응답을 보여주기 위한 SIMULINK 결선도이고, 그림 2.6은  $K_p = 1$ ,  $T_d = 1$ ,  $N = 10$ 일 때의 응답을 보여준다.

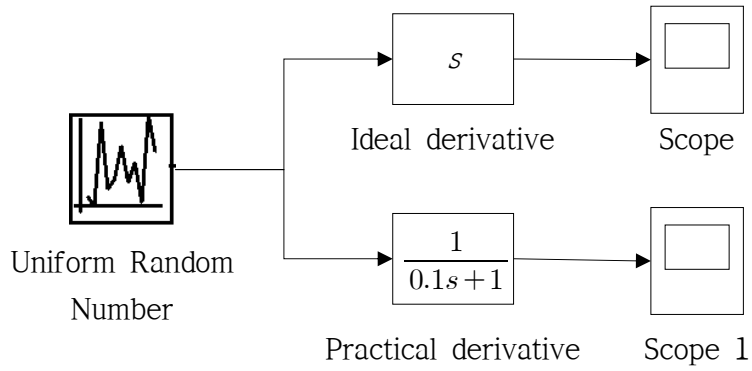
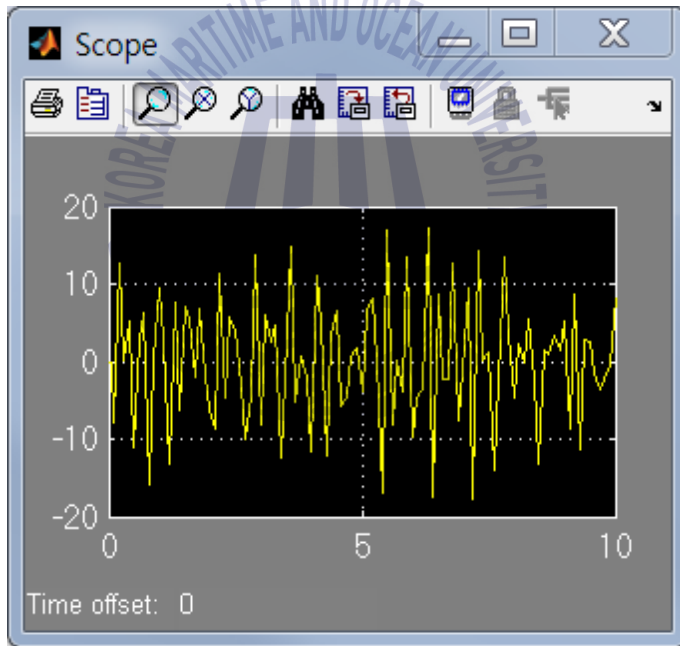
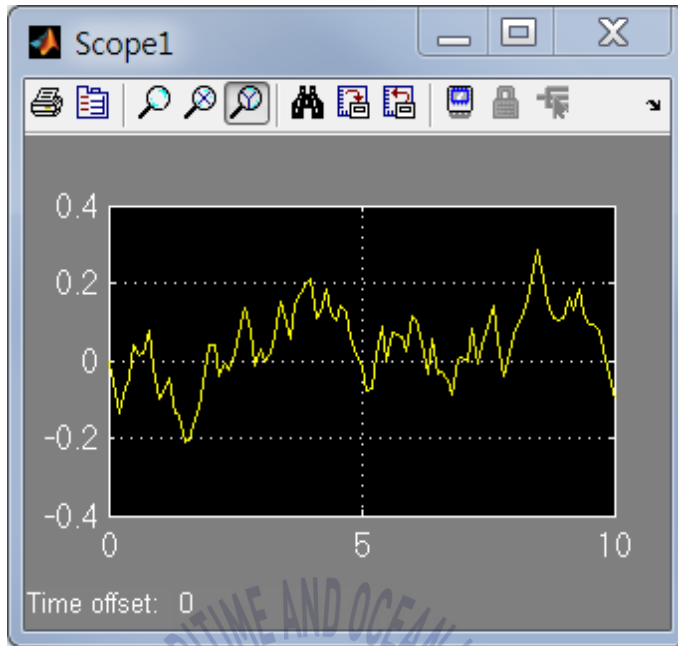


그림 2.5 이상적인 미분동작과 실제적인 미분동작  
 Fig. 2.5 Ideal derivative and practical derivative



(a) 이상적인 미분





(b) 1차 필터를 갖는 미분

그림 2.6 이상적인 미분과 1차 필터를 갖는 미분의 응답

Fig. 2.6 Responses of ideal derivative and practical derivative

그림에서도 확인할 수 있듯이 동일한 크기의 잡음이 입력되었음에도 불구하고 이상적인 미분의 경우에는 응답의 크기가 -18~18 사이지만(그림 2.6(a)), 1차 필터를 갖는 미분의 경우에는 크기가 -0.3~0.3 사이에 있는 것(그림 2.6(b))을 알 수 있다.

한편 입력포화는 다음 식으로 정의된다.

$$u_{sat}(t) = \begin{cases} u_{min}, & u(t) < u_{min} \\ u(t), & u_{min} \leq u(t) < u_{max} \\ u_{max}, & u(t) \geq u_{max} \end{cases} \quad (2.5)$$

식 (2.5)에서 알 수 있듯이  $u(t)$ 가 최댓값  $u_{max}$  보다 크면  $u_{sat}(t) = u_{max}$ 가 되고, 반대로 최솟값  $u_{min}$  보다 작으면  $u_{sat}(t) = u_{min}$ 가 되고, 나머지 구간에서는  $u_{sat}(t) = u(t)$ 가 된다.

## 2.4 PID 제어기 동조

### 2.4.1 동조란

PID 제어기(Proportional-Integral-Derivative controller)는 비례(Proportional), 적분(Integral), 미분(Derivative) 제어를 하나 혹은 두 가지 이상을 결합하여 사용한다. PID 제어기는 기본적으로 피드백 제어기의 형태를 가지고 있다. 출력값을 측정하여 참조 값과 비교하여 오차를 계산하고, 제어에 필요한 제어 값을 계산하는 구조이다. 이 때, 시스템을 안정화 시키고 최적의 기능을 수행하기 위해 제어기 계수를 조정하는 행위를 동조(tuning)라 한다.

예를 들어, 비례 제어는 PID 제어기에서 반드시 사용하는 가장 기본적인 제어이며 구현하기가 쉽다. 그러나 적분기가 플랜트에 없을 경우 정상상태 오차가 발생할 수 있다. 적분 제어는 정상상태 오차를 제거하는데 사용된다. 그러나 적분이득을 잘못 조정하면 시스템이 불안해지고 반응이 느려진다. 미분 제어는 잘 활용하면 안정성에 기여하고, 예측기능이 있어 응답속도를 빠르게 한다. 하지만, 시스템에 잡음성분이 있을 때 미분 값이 커지게 되므로 제어 입력에 나쁜 영향을 미치기 때문에 이 점에 주의해야 한다. 따라서 출력을 원하는 참조값으로 조절하기 위한 PID 계수를 적절히 조정하는 것을 동조라 할 수 있다.

### 2.4.2 동조방법

PID 제어기 동조법은 크게 모델이 주어지지 않은 경우에 적용하는 무모델 동조법과 모델이 주어진 경우에 적용하는 모델기반 동조법으로 나눌 수 있다. 무모델 PID 계수 동조법은 제어 대상의 시스템 모델을 모르는 경우에 적용하며, 일정한 개로 또는 폐로응답으로 PID 제어기 계수를 결정하는 방법이다. 반대로, 모델기반 PID 계수 동조법은 제어 대상의 시스템 모델이 어떤 방법으로 주어진 경우에 시스템 모델을 기반으로 PID 제어기 계수를 결정하는 방법이다. 본 논문에서는 PID 제어기의 동조방법 중 가장 대표적인 지글러-니콜스(Ziegler-Nichols) 방법을 간략하게 설명하도록 한다.

지글러-니콜스 방법 중 한 가지는 계단응답곡선을 이용함으로써 PID 계수를 선정할 수 있다. 주어진 플랜트에 단위계단 입력을 넣은 후에 그 출력응답을 구하고, 이 단위계단응답 곡선으로부터 어떤 특성계수를 통해 PID 계수를 선정

할 수 있다. 이 방법은 대상 플랜트에 적분기가 포함되어 있지 않고 주극점이 복소근이 아닌 안정한 시스템에만 적용할 수 있다. 이 조건이 만족되는 시스템에서의 개로계단응답 곡선의 모양은 일반적으로 S자 형태를 띤다. 만일 계단응답이 S자형이 아닌 경우에는 이 방법을 사용할 수 없다. S자 모양의 응답곡선을 통하여 지연시간  $L$ , 시정수  $\tau$ , 직류이득  $K$ 의 세 가지 특성계수를 구할 수 있다. 지연시간은 S자 모양의 응답곡선의 변곡점에서 접선을 그은 다음 그 접선이 시간 축과 만나는 점이며, 시정수는 응답곡선이 추종하는  $K$ 에 해당하는 점으로부터 구할 수 있다. 위의 세 가지 특성계수를 아래의 표를 이용하여 PID 제어기의 계수를 구할 수 있다.

표 2.1 지글러-니콜스 계단응답법

Table 2.1 Ziegler-Nichols tuning rule (first method)

제어기의 종류	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{\tau}{KL}$	-	-
PI	$0.9 \frac{\tau}{KL}$	$\frac{L}{0.3}$	-
PID	$1.2 \frac{\tau}{KL}$	$2L$	$0.5L$

## 제 3 장 적분기 안티와인드업 기법

### 3.1 적분기 와인드업

일반적으로 액추에이터 포화가 있는 제어시스템에서 설정치를 크게 변경하면 제어기의 출력이 한계치( $u_{\max}$  또는  $u_{\min}$ )에 도달하여 일정한 값으로 제한되고 이로 인해 출력에는 변동이 일어나지 않고 적분기에는 오차가 계속 누적되어 커지는 현상을 적분기 와인드업(Integral wind-up)이라 한다. 이로 인해, 정작 출력이 설정치에 가까워졌을 때에는 제어입력이 작아져야 함에도 불구하고 포화 동안에 누적된 적분값으로 인해 포화에서 벗어나는 데 상당한 시간이 소요되고, 결과적으로 오버슈트(Overshoot)가 커지고, 도달시간(Rise time)과 정착시간(Settling time)이 길어지게 된다.

그림 3.1은 적분기 와인드업 현상의 한 예를 보여주고 있다. 그림 2.1의 시스템에 제어대상으로  $P(s) = 5e^{-0.5s}/(1+2s)$ , 제어기로  $C(s) = 0.9 + 1.2/s + 0.2s$ 를 하였을 때 응답이고, 굵은 실선은 포화기의 한계값으로  $u_{\min} = -1$ ,  $u_{\max} = 1$ 을 사용했을 때의 응답이다. 포화가 없을 때의 응답은  $M_p = 72.9\%$ ,  $t_r = t_{90} - t_{10} = 0.3[\text{sec}]$ ,  $2\% t_s = 4.1[\text{sec}]$ 의 성능을 갖지만, 포화기가 추가되면  $M_p = 69.5\%$ ,  $t_r = 0.9[\text{sec}]$ ,  $t_s = 5.5[\text{sec}]$ 와 같이 도달시간과 정착시간이 더 길어진다.

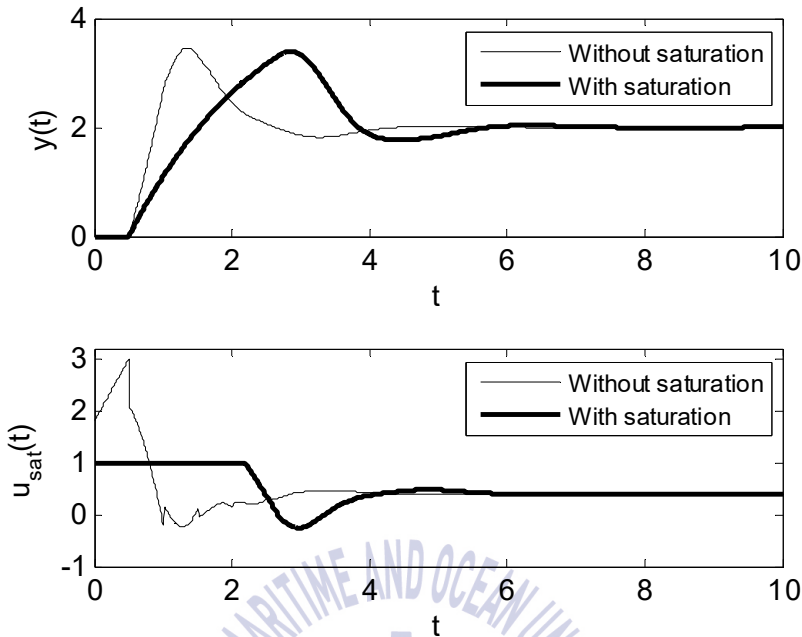


그림 3.1 포화가 있는 또 없는 시스템의 계단 응답

Fig. 3.1 Step responses of a system with and without a saturation

### 3.2 기존의 적분기 안티와인드업 기법

적분기 와인드업을 피할 수 있는 가장 직관적인 방법은 제어기 출력(포화기 입력)에 포화가 일어나지 않도록 해주는 것이며, 크게 두 가지 방법이 제안되고 있다[6]. 하나는 비선형 제어기법을 사용하는 것이고, 다른 하나는 적분 와인드업을 보상할 수 있는 부가적인 기능, 즉 적분기 안티와인드업(Anti-windup)을 사용하는 것이다. 전자는 효과적인 설계 방법 중 하나이지만 제어대상에 따라 다르게 설계해야 할 수 있고, 후자는 표준형 PID 제어기를 사용할 때 기존의 동조규칙을 그대로 적용할 수 있는 장점이 있어 선호되는 방법이다.

여기서는 후자의 방법 중 대표적인 몇 가지 방법들에 대해 살펴본다.

### 3.2.1 조건부 적분 안티와인드업법

조건부 적분 안티와인드업(CI-AW: Conditional Integration Anti-Windup)법은 적분기 와인드업 영향을 경감시킬 수 있는 간단한 방법 중 하나이며, 제어기가 포화기의 선형영역 내에서 동작할 때에는 정상적인 적분동작을 하다가(ON 상태), 포화상태로 들어가게 되면 특정 조건에 따라 적분기를 멈추게(OFF 상태) 된다. Rundqwist [6]는 4가지의 CI-AW법을 제안하면서 그 중에서 다음 방법이 더 효과적임을 밝히고 있다.

$$u_i = \begin{cases} 0 & , u_{sat} \neq u \text{ and } e(u - \bar{u}) > 0 \\ \frac{K_p}{T_i} e & , otherwise \end{cases} \quad (3.1)$$

여기서  $\bar{u}$ 는 포화기의 최솟값과 최댓값의 평균, 즉  $\bar{u} = (u_{max} + u_{min})/2$ 를 의미한다.

### 3.2.2 추종 안티와인드업법

일명 Back calculation 으로도 알려진 추종 안티와인드법(Tracking-AW: Tracking Anti-Windup) [1]은 제어입력이 포화될 때 적분값이 커지지 않도록 적분동작을 적절히 제어하게 된다. 구체적으로는 그림 3.2와 같이 포화기의 입출력 차이 ( $u_{sat} - u$ ), 즉 포화오차(Saturation error)를 적분기의 입력 단에 피드백하여 적분동작을 수정하게 된다. 이렇게 함으로써 적분값이 감소되거나 증가하게 된다.

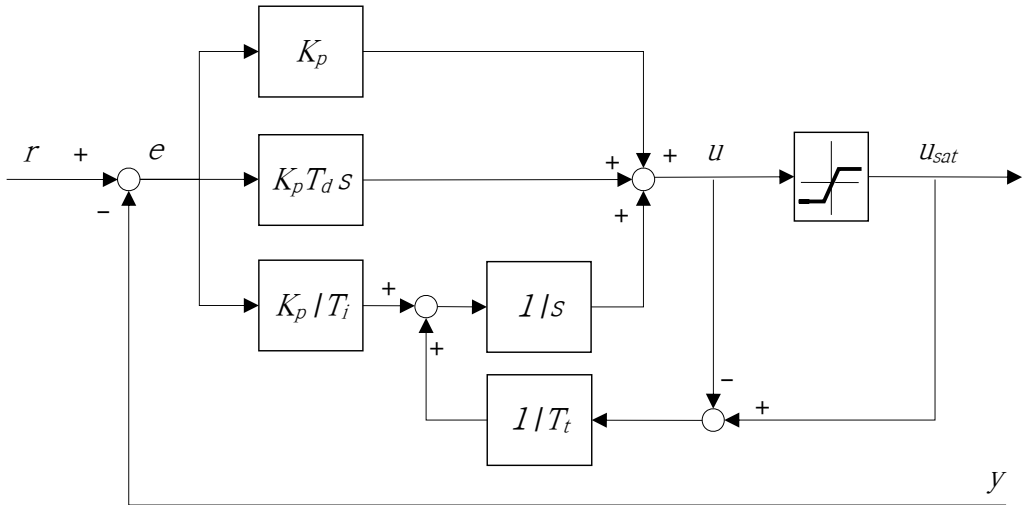


그림 3.2 Tracking 안티와인드업법  
 Fig. 3.2 Tracking anti-windup method

이 방법에서 적분기의 입력은 다음 식으로 주어진다.

$$u_i = \frac{K_p}{T_i} e + \frac{1}{T_t} (u_{sat} - u) \quad (3.2)$$

여기서  $T_t$ 는 추종시간정수(Tracking time constant)로서 포화기의 시정수를 의미하며, 경험적으로 정해지는 상수이다. Åström과 Hägglund [1]는  $T_t = \sqrt{T_i T_d}$ 를, Bohn과 Atherton [8]은  $T_t = T_i$ 를 제안하고 있다.

### 3.2.3 가변구조 PID 안티와인드업법

가변구조 PID 안티와인드업(VSPID-AW: Variable Structure PID Anti-Windup) 법[7]은 Tracking-AW법의 수정된 형태이며 u가 포화에 들어가면 u가 포화기의 가장자리에 놓이도록 다음 조건에 따라 적분기의 입력을 스위칭하게 된다. 스위칭 상태에 따라 PID 제어기의 구조가 가변되는 특징이 있어 VSPID-AW로 일컫는다.

$$u_i = \begin{cases} \frac{\alpha}{T_t}(u_{sat} - u), & u_{sat} \neq u \text{ and } e(u - \bar{u}) > 0 \\ \frac{K_p}{T_i}e & , otherwise \end{cases} \quad (3.3)$$

여기서  $\alpha$ 는 포화기의 응답속도를 결정짓는 양의 상수이다. 그림 3.3은 VSPID-AW법을 채용했을 때의 제어기 구조를 보여주고 있다.

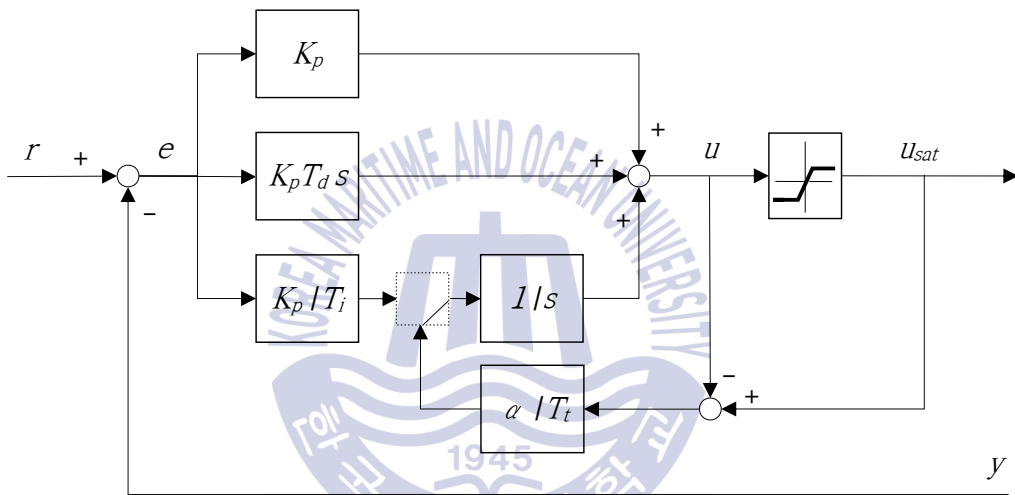


그림 3.3 가변구조 PID 안티와인드업법

Fig. 3.3 Variable structure PID anti-windup method

### 3.2.4 제안하는 안티와인드업법

앞서 살펴본 3가지 방법 중 본 논문에서 채용할 안티와인드업 기법의 구조를 선택하기 위해 식 (3.4)의 시간지연을 갖는 일차(First-order plus dead time: FOPDT) 시스템 대상으로 성능평가를 실시하였다.

$$P(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{1 + \tau s} \quad (3.4)$$



여기서  $K$ 는 이득,  $\tau$ 는 시정수,  $L$ 은 시간지연을 의미한다.

$K=1$ ,  $\tau=10$ ,  $L=8$ 의 제어대상에 대해 PID 제어를 Z-N 개회로법으로 동조하였고, Tracking-AW법의 경우  $T_t = T_i$ , VSPID-AW법의 경우  $T_t = T_i$ ,  $\alpha = 1$ 로 하였다. 성능평가를 위해 각 방법에 대해  $M_p$ ,  $t_r = t_{90} - t_{10}$ , 2%  $t_s$ 를 구하였다.

표 3.1 안티와인드업법의 성능 비교

Table 3.1 Performance comparison of the anti-windup methods

Anti-windup methods	Performances			Remarks
	$M_p$	$t_r$	$t_s$	
CI-AW	0.00	23.89	65.06	
Tracking-AW	5.02	10.09	56.53	
VSPID-AW	0.00	23.90	65.06	

표 3.1에서 보면 CI-AW법과 VSPID-AW법은 오버슈트는 없지만 서서히 설정치에 도달하는 느린 응답특성을 보이며, Tracking-AW법은 오버슈트는 약간 발생하지만 응답이 상대적으로 빠르고 개선의 여지가 있었다. 따라서 본 연구에는 Tracking-AW법의 피드백 요소를 약간 수정한 식 (3.5)를 제안한다.

$$u_i = \frac{K_p}{T_i} e + \frac{\alpha}{T_i} (u_{sat} - u) \quad (3.5)$$

여기서  $\alpha$ 는 포화기의 응답속도를 결정짓는 양의 상수로서 사용자 조정 파라미터이며, 최적화 알고리즘으로 동조된다.

## 제 4 장 안티와인드업을 갖는 PID 제어기의 동조

### 4.1 기존의 방법

앞서 언급하였듯이 안티와인드업 기법을 채용하는 기존의 방법들은 대부분의 경우 PID 제어기가 포화기의 선형구간에서 동작하는 것으로 간주하고 포화기를 고려하지 않은 상태에서 기존의 동조규칙으로 동조하게 된다. 그런 다음 적분 와인드업을 보상하도록 부가적인 피드백이나 스위칭 기능을 추가해서 성능을 개선하고 있다.

이를 요약하면 다음과 같다.

- **Step 1:** Tune  $\{K_p, T_i, T_d\}$  of  $C(s)$  without saturation
- **Step 2:** With fixing  $\{K_p, T_i, T_d\}$ , add an additional feedback loop or switching logic for anti-windup

이러한 방법들은 제어기가 선형구간 내에서 동작할 때에는 동조 당시의 성능이 유지되지만, 선형구간을 벗어나면 보상이 이루어지더라도 이전만큼 성능이 좋지 못하게 된다. 다시 말해 이들은 비선형 포화기와 안티와인드업 기법을 가진 전체 시스템에 대한 최적화를 고려하지 않고 있다.

### 4.2 수정된 안티와인드업을 갖는 PID 제어기

앞서 Tracking-AW법에는 개선의 여지가 있음을 확인하였다. 식 (2.3)의 제어기 구조에 식 (3.5)의 피드백을 구성하여 적분기 와인드업에 대처하도록 하였다. 그림 4.1은 수정된 안티와인드업 기법이 결합된 PID 제어기를 보여준다.

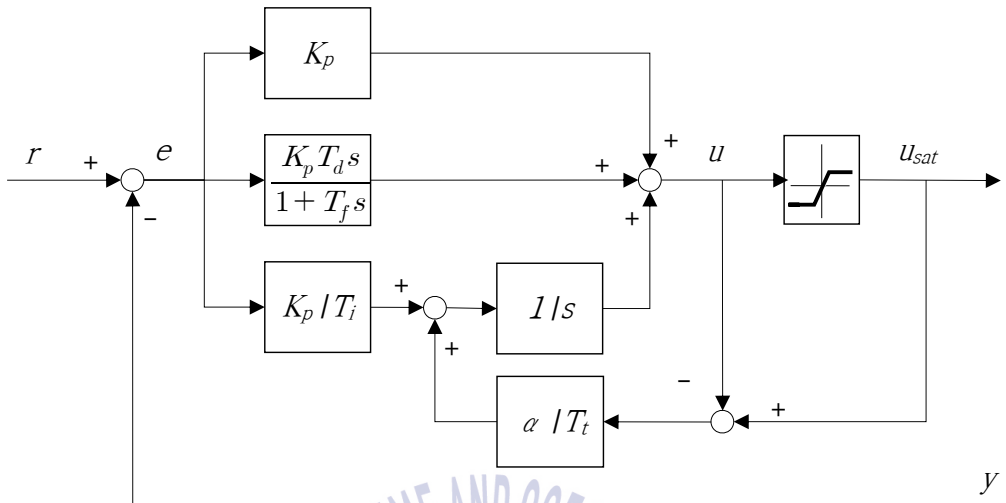


그림 4.1 수정된 안티와인드업 기법이 결합된 PID 제어기  
 Fig. 4.1 PID controller with a modified-AW method

### 4.3 GA를 이용한 파라미터 동조

앞서 언급하였듯이 본 논문에서는 안티와인드업 기법을 결합한 PID 제어기를 제안하였기 때문에 동조해야 할 파라미터는  $\{K_p, T_i, T_d, \alpha\}$ 이며, 이를 동시에 최적화하는 문제를 다룬다. 최적화 도구로는 유전알고리즘(Genetic Algorithm: GA)을 사용한다[10]. GA는 자연선택과 유전학을 기반으로 하는 진화 알고리즘으로서 선택과 교배와 돌연변이를 기본 연산자로 취하고 있다. 선택 연산자는 현 세대 개체들의 적합도에 따라 선택하여 교배급원을 형성해주며, 교배 연산자는 개체간의 정보를 교환해주며, 돌연변이 연산자는 전역탐색을 해주면서 또한 지역해로 빠지는 것을 막아준다. 그림 4.2는 유전알고리즘의 기본 단계를 보여준다.

선택 연산자는 구배와 유사한 연산자를, 교배로는 산술적 연산자로, 돌연변이는 세대가 진행됨에 따라 탐색영역을 좁혀나가는 불균형 돌연변이(Non-uniform mutation) 연산자 [11]를 사용한다. 전체 알고리즘은 다음과 같이 요약된다.

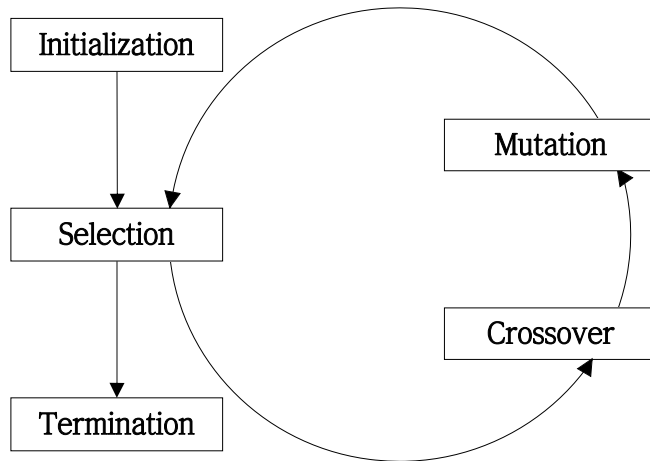


그림 4.2 유전알고리즘의 기본 단계

Fig. 4.2 Basic steps of a GA

#### Overall procedure of the GA

Set  $k = 0$ ;

Initialize population  $P(0)$  of size  $N$  randomly;

Evaluate fitness  $f_i(k) (1 \leq i \leq N)$  and select the best  $\{x_b(k), f_b(k)\}$ ;

**While** <termination conditions are not met>

Select chromosomes based on individual fitness;

Crossover parent chromosomes to generate offsprings;

Mutate chromosomes;

Apply elitism if necessary;

Evaluate fitness  $f_i(k+1) (1 \leq i \leq N)$  and select the best  $\{x_b(k+1), f_b(k+1)\}$ ;

Set  $k = k+1$ ;

**End while**

본 논문에서는 집단의 크기로  $N = 40$ , 선택자의 매개변수로  $\eta = 1.8$ , 교배확률로  $p_c = 1$ 을, 돌연변이의 매개변수로  $p_m = 0.05$ ,  $b = 4$ 를 사용하였다.

한편, 시스템의 성능이 좋고 나쁨을 계량하기 위해 식 (4.1)의 절대오차적분 (Integral of Absolute Error: IAE)을 평가함수로 사용하였다.

$$\mathcal{J}(\phi) = \int_0^{t_f} |r(t) - y(t)| dt \quad (4.1)$$

여기서  $\phi = [K_p, T_i, T_d, \alpha]^T \in \mathbf{R}^4$ 는 PID 제어기와 안티와인드업 파라미터로 구성된 벡터이고, 적분시각  $t_f$ 는 이후의 적분값이 무시되어도 좋을 정도로 충분히 큰 값이다.  $\phi$ 는 GA를 사용하여 식 (4.1)의 평가함수가 최소가 되도록 구해진다.

최적화 절차를 간단히 요약하면 다음과 같다.

- **Step 1:** Add the feedback loop of Eq. (3.5) as an integrator anti-windup scheme to the PID controller of Eq. (2.3)
- **Step 2:** Tune  $\{K_p, T_i, T_d, \alpha\}$  simultaneously using the GA such that Eq. (4.1) is minimized

## 제 5 장 모의 실험 및 결과 검토

이장에서는 앞서 제안한 방법의 유효성을 검증하기 위하여 세 고차 프로세스를 대상으로 모의실험을 실시하고 기존의 Z-N 개회로동조법[2], IMC 동조법[3], Cvejn 동조법[4]과 비교하였다. 기존의 세 방법들은 S-커브형의 프로세스 응답을 식 (3.4)의 FOPDT 모델로 근사화시켜 이로부터  $K, T, L$ 을 얻으면 다음 동조규칙으로 동조한다.

표 5.1 S-커브 응답에 기초한 동조규칙

Table 5.1 Tuning rules based on the S-curve response

Tuning method	Parameters			Remarks
	$K_p$	$T_i$	$T_d$	
Z-N	$\frac{1.2T}{KL}$	$2L$	$\frac{L}{2}$	open-loop
IMC	$\frac{T + \frac{L}{2}}{K(\lambda + \frac{L}{2})}$	$T + \frac{L}{2}$	$\frac{TL}{2T + L}$	$\lambda > 0.8L$
Cvejn	$\frac{1}{4K}(1 + \frac{3T}{L})$	$T + \frac{L}{3}$	$\frac{L}{3 + \frac{L}{T}}$	

이를 적용하기 위해서는 비교대상의 프로세스들은 온라인 파라미터 추정법 [12]으로 FOPDT 모델로 근사화된다. FOPDT 모델이 얻어지면 세 방법들은 액추에이터 포화를 고려하지 않은 상태에서 동조되고, 본 방법과의 비교의 공정성이 유지되도록 모두 식 (3.2)의 안티와인드업 피드백을 적용하되  $T_i = T_i$ 로 하였다. 포화기의 최소값과 최대값은 각각  $u_{\min} = 0$ ,  $u_{\max} = 1.5$ 로 간주하였고, IMC 법의 경우  $\lambda = 0.9L$ 을 사용하였다.

## 5.1 프로세스 I

첫 번째 모의실험에 사용된 프로세스는 시간지연을 갖는 3차 시스템이다.

$$P(s) = \frac{e^{-0.2s}}{(1+0.5s)(1+s)(1+2s)} \quad (5.1)$$

제안된 방법을 폐회로 제어 시스템에 적용하여 파라미터를 최적 동조하였고, 이때 각 파라미터의 탐색구간은  $0 < K_p, T_i, T_d, \alpha \leq 10$  으로 하였다. 탐색과정을 그린 그림 5.1에서 보면 약 55 세대 부근에서 해를 찾는 것을 알 수 있다.

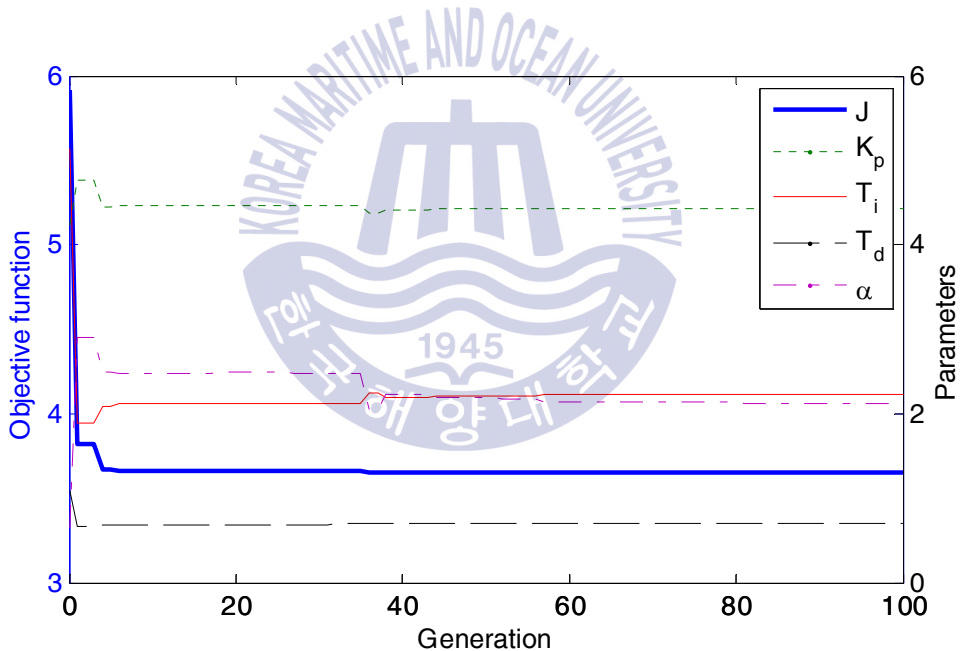


그림 5.1 GA를 이용한 파라미터 동조  
Fig. 5.1 Parameter tuning using the GA

한편, 기존의 방법을 적용하기에 앞서 프로세스 I로부터 FOPDT 모델의 매개 변수를 얻는 작업이 요구되며, 이들은 구간  $0 \leq K, \tau \leq 10$ ,  $0 \leq L \leq 5$ 에서 GA로 탐색되었다. 탐색 결과  $K=1.00$ ,  $\tau=2.28$ ,  $L=1.55$ 을 얻을 수 있었다. 이 프로세스

는 시간지연에 비해 시정수가 다소 큰, 즉  $L/\tau = 0.68 < 1$ 인 시스템임을 알 수 있다.

제안한 방법과 기존의 방법으로 동조한 결과는 표 5.2에 정리하였다.

표 5.2 프로세스 I에 대한 동조된 파라미터  
Table 5.2 Tuned parameters for Process I

Tuning method	Parameters			
	$K_p$	$T_i$	$T_d$	$\alpha$
Proposed	4.429	2.227	0.705	2.129
Z-N	1.765	3.100	0.775	-
IMC	1.408	3.055	0.578	-
Cvejn	1.353	2.797	0.421	-

각 방법에 따른 제어기의 설정치 추종성능을 확인하기 위해 외란  $d$ 를 0으로 한 상태에서 단위계단입력을 인가하였다. 그림 5.2는 이때의 출력  $y(t)$ 와 입력 포화기의 출력  $u_{sat}(t)$ 를 그린 것이고 표 5.3은 정량적인 성능 오버슈트  $M_p$ , 피크시간  $t_p$ , 도달시간  $t_r = t_{90} - t_{10}$ , 2% 정착시간  $t_s$ 와 오차의 절대합  $IAE$ 를 구해 정리한 것이다.



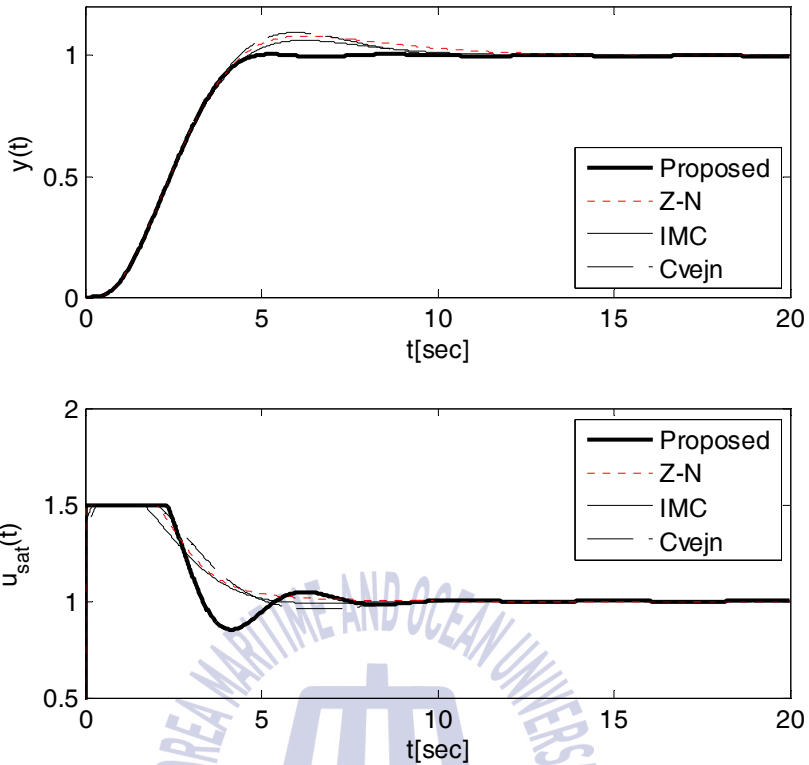


그림 5.2 프로세스 I에 대한 설정치 추종응답 비교

Fig. 5.2 Comparison of set-point tracking responses for Process I

그림에서 알 수 있듯이 시간이 경과됨에 따라 모든 응답들은 설정치에 접근하지만 제안한 방법이 다른 세 방법보다 전반적으로 더 나은 것을 알 수 있다. 특히 세 방법은 제안된 방법보다 오버슈트가 크고, Z-N법의 경우  $t_s$ 가 더 크게 나왔다.

표 5.3 프로세스 I에 대한 성능

Table 5.3 Performances for Process I

Tuning method	Performances				
	$M_p$	$t_p$	$t_r$	$t_s$	$IAE$
Proposed	0.651	5.280	2.667	4.450	1.239
Z-N	8.290	6.260	2.665	11.054	1.422
IMC	6.387	6.200	2.734	9.354	1.361
Cvejn	9.597	5.980	2.635	9.003	1.385

다음은 4개의 파라미터를 동시에 동조하는 본 방법과 기존의 접근법과 유사하게 포화기가 없는 폐회로 시스템에서  $\{K_p, T_i, T_d\}$ 를 먼저 동조한 후 이 값을 가지고 다시  $\alpha$ 를 동조하는 준최적(Suboptimal)의 경우와 성능비교를 위해 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과  $K_p=2.720$ ,  $T_i=3.289$ ,  $T_d=0.910$ ,  $\alpha=1.161$ 을 얻었고 응답을 그린 것이 그림 5.3이며,  $M_p=1.096$ ,  $t_r=2.949$ , 2%  $t_s=5.518$ 을 성능으로 얻었다. 표 5.2의 성능과 비교하고 또 응답을 확대한 그림에서 보면 본 방법의 타당성을 설명해주고 있다.

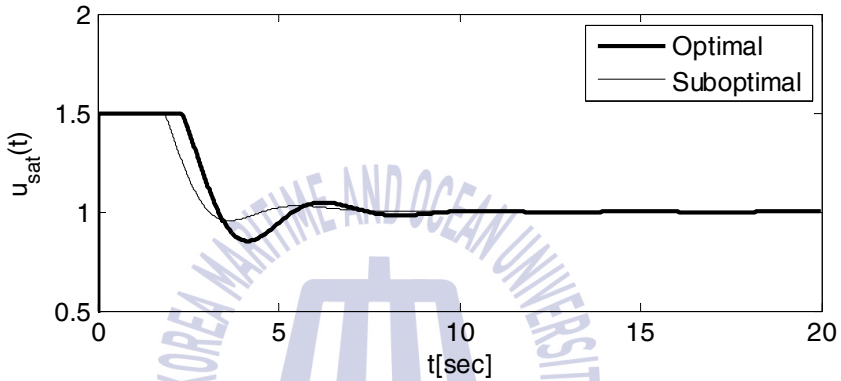
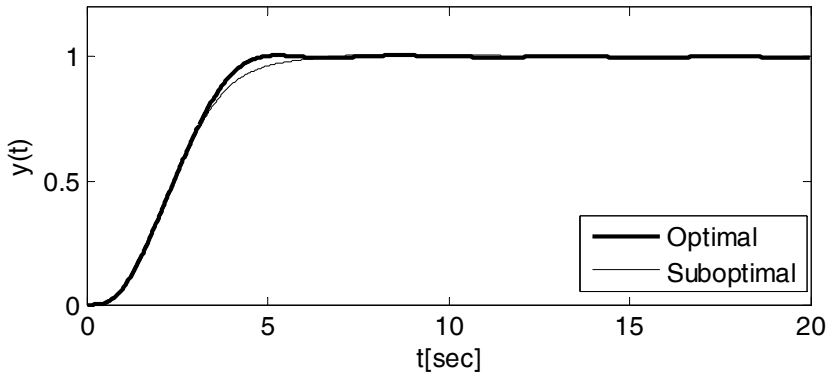


그림 5.3 프로세스 I에 대한 최적 및 준최적 설정치 추종응답

Fig. 5.3 Optimal and suboptimal set-point tracking responses for Process I

다음은 잡음에 대한 제안하는 방법의 민감성을 살펴보기 위해 출력 측에 정규잡음  $N(0,0.003^2)$ 을 더하고 단위계단응답과 출력을 그렸다.

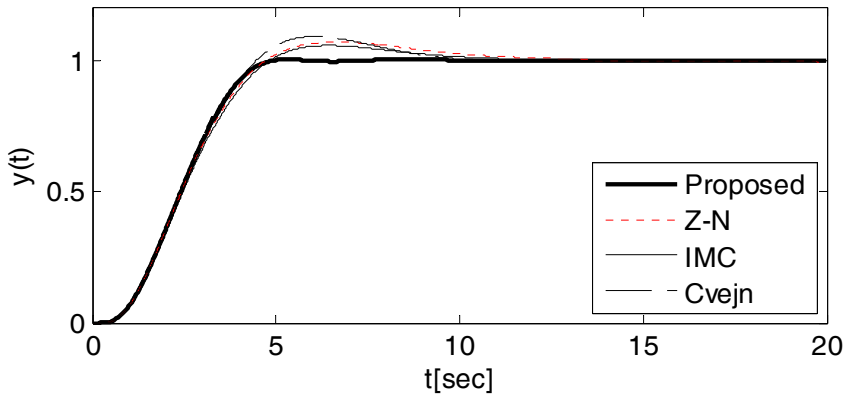


그림 5.4 정규잡음  $N(0,0.003^2)$ 이 있을 때의 설정치 추종응답

Fig. 5.4 Set-point tracking responses when random noises  $N(0,0.003^2)$  exist

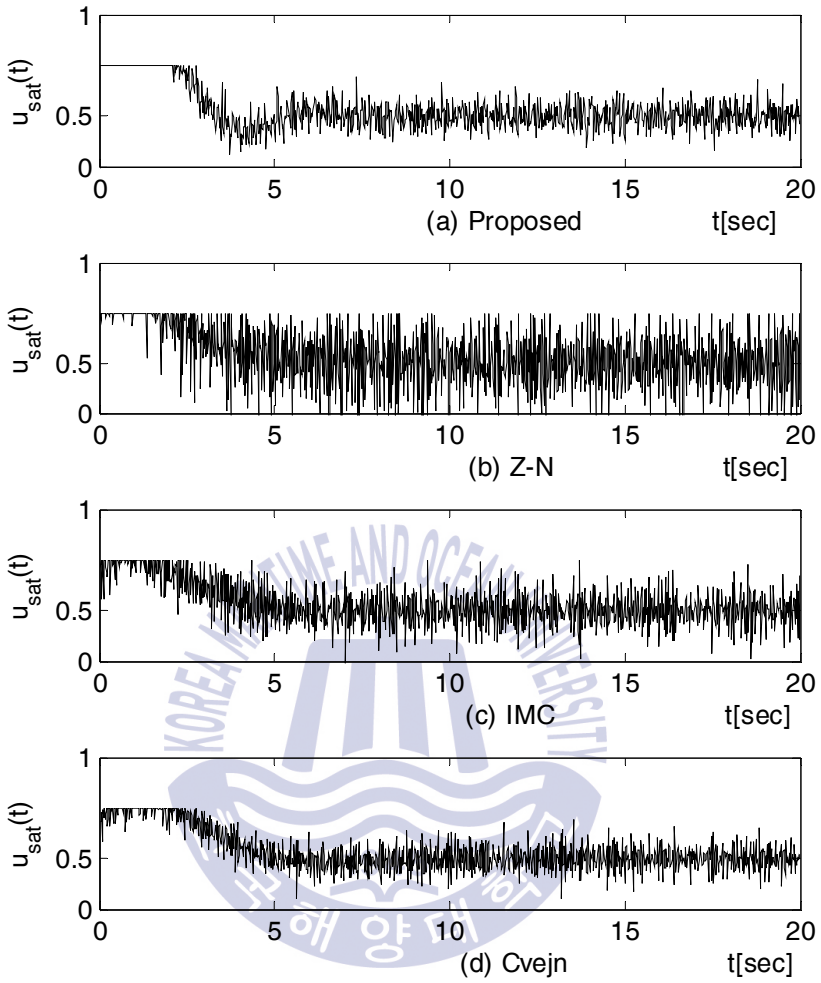


그림 5.5 정규잡음  $N(0,0.003^2)$ 이 있을 때의 입력

Fig. 5.5 Saturated input when random noises  $N(0,0.003^2)$  exist

앞의 그림과 표 5.2에서 보면 본 방법의 비레이득이 다른 방법에 비해 크에도 불구하고 잡음에 둔감하고 또 입력에 나타나는 채트링 현상도 그리 크지 않음을 알 수 있다.

## 5.2 프로세스 II

두 번째 모의실험으로 식 (5.2)로 주어지는 3차 시스템을 사용하였다[15]. 포화기의 최솟값과 최댓값은 앞서 사용한 값과 동일하다.

$$P(s) = \frac{e^{-5s}}{(1+s)^4} \quad (5.2)$$

탐색구간을  $0 < K_p, T_i, T_d, \alpha \leq 10$  으로 하여 앞의 경우와 같이 제안된 방법을 적용한 결과 얻어진 파라미터들은 표 5.4와 같다. 한편 식 (5.2)를 FOPDT 모델로 근사화 할 때 그 파라미터는  $K = 1.00, \tau = 2.4, L = 6.00$ 으로 추정되었다. 이 프로세스는 시정수에 비해 시간지연이 다소 큰, 즉  $L/\tau = 2.5 > 1$ 인 시스템 중 하나이다. FOPDT 모델을 대상으로 동조한 기존의 방법들을 적용한 결과도 표 5.4에 주어진다.

표 5.4 프로세스 II에 대한 동조된 파라미터

Table 5.4 Tuned parameters for Process II

Tuning method	Parameters			
	$K_p$	$T_i$	$T_d$	$\alpha$
Proposed	0.600	4.918	2.077	0.902
Z-N	0.480	12.000	3.000	-
IMC	0.643	5.400	1.333	-
Cvejn	0.550	4.400	1.091	-

단위계단상의 설정치 변경에 대한 응답을 그린 것이 그림 5.6이고, 정량적인 비교치는 표 5.4에 주어진다.

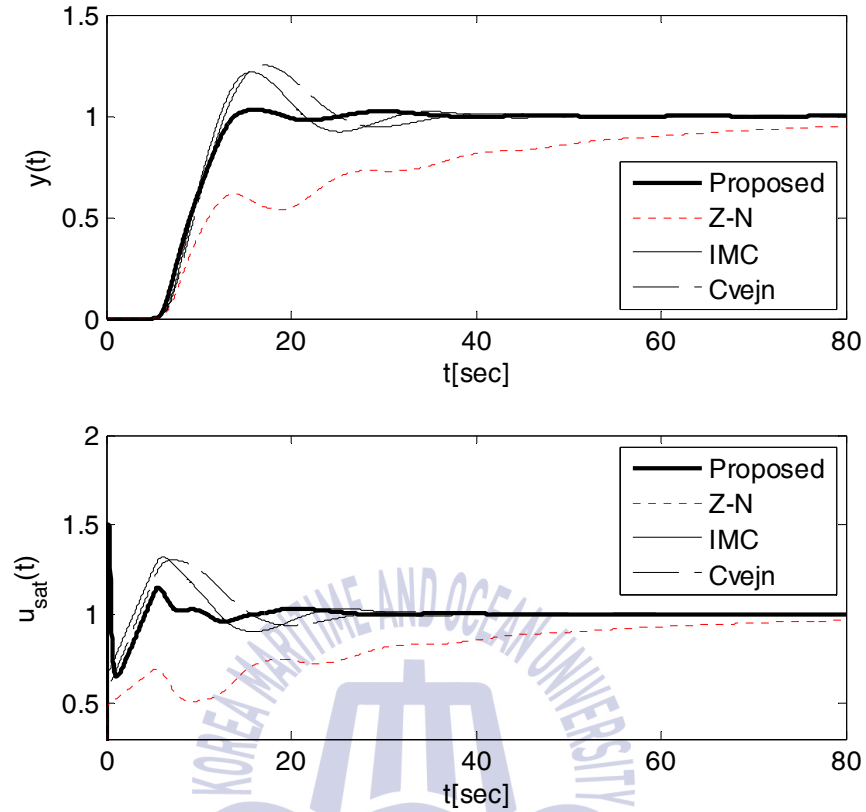


그림 5.6 프로세스 II에 대한 설정치 추종응답 비교

Fig. 5.6 Comparison of set-point tracking responses for Process II

표 5.5 프로세스 II에 대한 성능

Table 5.5 Performances for Process II

Tuning method	Performances				
	$M_p$	$t_p$	$t_r$	$t_s$	$IAE$
Proposed	3.055	16.160	5.809	31.930	4.848
Z-N	-	80.000	52.467	-	11.776
IMC	21.709	15.760	4.580	36.510	5.571
Cvejn	25.083	18.060	4.941	34.510	5.943

Z-N법은 제어에 어려움을 겪고, IMC법은 진동이 심한 반면, 제안한 방법은 다른 세 방법보다 우수함을 보이고 있다. 이 결과는 적분기 와인드업에 대처하는 기존의 방법들은 제어대상에 따라 전체 시스템의 성능이 좋지 못할 수도 있음을 보여준다.

### 5.3 프로세스 III

세 번째 모의실험으로 식 (5.3)의 주어지는 3차 시스템을 사용하였다. 포화기의 최솟값과 최댓값은 앞서 사용한 값과 동일하다.

$$P(s) = \frac{e^{-5s}}{(1+s)^2(1+2s)} \quad (5.3)$$

탐색구간을  $0 < K_p, T_i, T_d, \alpha \leq 10$  으로 하여 앞의 경우와 같이 제안된 방법을 적용한 결과 얻어진 파라미터들은 표 5.5와 같다. 한편 식 (5.3)을 FOPDT 모델로 근사화 할 때 그 파라미터는  $K = 1.00$ ,  $\tau = 2.38$ ,  $L = 6.78$ 로 추정되었다. 이 프로세스는 시정수에 비해 시간지연이 다소 큰, 즉  $L/\tau = 2.85 > 1$  이어서 제어하기가 까다로운 시스템 중 하나이다. FOPDT 모델을 대상으로 동조한 기존의 방법들을 적용한 결과도 표 5.6에 주어진다.

표 5.6 프로세스 III에 대한 동조된 파라미터

Table 5.6 Tuned parameters for Process III

Tuning method	Parameters			
	$K_p$	$T_i$	$T_d$	$\alpha$
Proposed	0.580	5.119	1.589	0.610
Z-N	0.421	13.560	3.390	-
IMC	0.608	5.770	1.398	-
Cvejn	0.513	4.640	1.159	-

단위계단상의 설정치 변경에 대한 응답을 그린 것이 그림 5.7이고, 정량적인 비교치는 표 5.4에 주어진다.

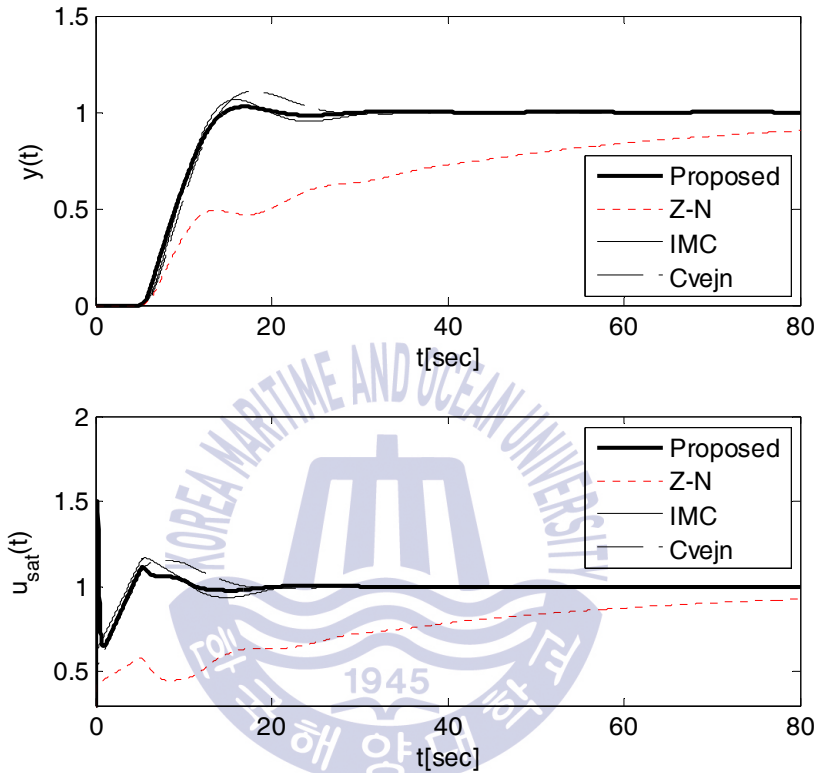


그림 5.7 프로세스 III에 대한 설정치 추종응답 비교

Fig. 5.7 Comparison of set-point tracking responses for Process III

표 5.7 프로세스 III에 대한 성능

Table 5.7 Performances for Process III

Tuning method	Performances				
	$M_p$	$t_p$	$t_r$	$t_s$	$IAE$
Proposed	2.896	16.960	6.335	18.572	4.768
Z-N	-	80.000	70.929	-	14.308
IMC	6.537	16.080	5.557	28.864	5.008
Cvejn	10.844	18.060	6.051	24.924	5.308



Z-N법은 제어에 어려움을 겪고, IMC법은 진동이 심한 반면, 제안한 방법은 다른 세 방법보다 우수함을 보이고 있다. 이 결과는 적분기 와인드업에 대처하는 기존의 방법들은 제어대상에 따라 전체 시스템의 성능이 좋지 못할 수도 있음을 보여준다.



## 제 6 장 결론

본 논문에서는 안티와인드업 기법을 가진 PID 제어기의 추종 성능을 개선하는 문제를 다루었다. 기존의 방법들이 비선형 포화기를 고려하지 않은 상태에서 제어기를 동조한 후 안티와인드업 기법을 적용함으로써 성능 개선의 여지가 있음을 확인하였다. 기존 설계방법의 단점을 보완하기 위해 먼저 기존의 안티와인드업 기법을 분석하여 Tracking-AW법을 택하였고, 추종성능이 개선되도록 EA를 이용하여 IAE를 최소로 하는 관점에서 PID 제어기와 Tracking-AW의 파라미터를 구하였다.  $L/\tau$ 이 0과 3 사이에 있는 세 고차 프로세스를 대상으로 시뮬레이션을 실시한 결과 기존의 방법보다 성능이 양호함을 확인하였다.

차후 본 방법의 비선형 시스템에 적용, 최대 미분이득  $N$ 을 동시에 최적화하는 연구 등이 필요하다고 생각된다.



## 참고문헌

- [1] K. J. Åström and T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*, ISA Press, 1995.
- [2] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, “Optimum setting for PID controllers,” *Trans. ASME*, vol. 64, pp. 759-768, 1942.
- [3] M. Morari and E. Zafiriou, *Robust Process Control*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.
- [4] J. Cvejn, “PI/PID controller design for FOPDT plants based on the modulus optimum criterion,” *Proc. of the 18th International Conference on Process Control*, Tatranská Lomnica, Slovakia, pp. 301-306, 2011.
- [5] N. J. Krikelis, “State feedback integral control with ‘intelligent’ integrators,” *International Journal of Control*, vol. 32, no. 3, pp. 465-473, 1980.
- [6] L. Rundqwist, “Anti-reset windup for PID controllers,” *Ph.D. Thesis*, Department of Automatic Control, Lund Inst. of Technology, Sweden, 1991.
- [7] A. S. Hodel and C. E. Hall, “Variable-structure PID control to prevent integrator windup,” *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 48, no. 2, pp. 442-451, 2001.
- [8] C. Bohn and D. P. Atherton, “An analysis package comparing PID anti-windup strategies,” *IEEE Systems Magazine*, vol. 15, no. 2, pp. 34-40, 1995.
- [9] S. Tarbouriech and M. Turner, “Anti-windup design: an overview of some recent advances and open problems,” *Control Theory & Applications, IET*, vol. 3, no. 1, pp. 1-19, 2009.
- [10] G. Jin and T. Tran, “A nature-inspired evolutionary algorithm based on spiral movements,” *Proc. of the SICE Annual Conference 2010*, Taiwan, pp. 1643-1647, 2010.

- [11] C. Z. Janikow and Z. Michalewicz, "An experimental comparison of binary and floating point representations in genetic algorithms," *Proc. of the 4th International Conference on Genetic Algorithms (ICGA 1991)*, San Diego, USA, pp. 31-36, 1991.
- [12] H. Lee and G. Jin, "On-line parameter estimation of continuous-time systems using a genetic algorithm," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 4, no. 1, pp. 76-81, 1998.
- [13] T. S. Kim, J. Yang, and O. Kwon, "A new anti-windup method using the linear quadratic observer," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 2, pp. 134-139, 2010.
- [14] T. S. Kim, and O. Kwon, "A new unified method for anti-windup and bumpless transfer," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 7, pp. 655-759, 2009.
- [15] A. Visioli, *Practical PID Control*, Springer-Verlag Ltd., London, 2006
- [16] A. O'Dwyer, *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules 2nd Edition*, World Scientific Publishing Co. Ltd., 2006

